

組立作業支援ロボットPaDY

著者	衣川 潤
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4509号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62050

氏名	衣川 潤	きぬ がわ じゅん
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成23年3月25日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻	
学位論文題目	組立作業支援ロボット PaDY	
指導教員	東北大学教授 小菅 一弘	
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘	東北大学教授 内山 勝
	東北大学教授 吉田 和哉	東北大学准教授 平田 泰久

論文内容要旨

製造現場においては安定した品質で効率的な生産を行うため、産業用ロボットは重要な役割を担っている。特に自動車の生産現場においては、付加価値を高めない作業や作業の無駄を排除し、効率的に生産できるように作業の自動化が推進されてきた。その結果、溶接工程や塗装工程においては作業の大半を産業用ロボットが担うようになった。しかし一方で自動化が実現していない工程が数多く残っている。特に、自動化が遅れている工程の例として自動車製造ラインにおける組立工程が挙げられる。組立工程において自動化が進まない主な原因としては、「様々な形状の部品のハンドリングが困難であること」、「部品の組み付け方向が変則的であること」、「作業の組み換えが頻繁にあること」などが挙げられる。こういった工程では、未だに数千個にも及ぶ部品の組み付け作業を人手による作業に頼っているのが現状である。このような工程では、作業者は作業場所そばに配置された部品と工具が備えられたワゴンと作業箇所の間を行き来してワゴンから部品の選択と工具の取り出しを行うなど、本来の作業以外に多くの時間と労力を割くことを余儀なくされている。

このような背景から、本研究では、この問題に対する解決策として、自動車の組立工程における小物部品の組み付け作業の支援を行う「組立作業支援ロボット PaDY (in-time Parts/tools Delivery to You robot)」を提案する(図1)。組立工程において、ロボットにより部品・工具を作業者の手元に差し出すことで、作業者の負担となる作業を減らし、作業者の負担軽減・作業効率の向上・作業ミスの未然防止を行うシステムの提案を行い、生産現場における組立作業を支援するロボットシステムを構築する基盤技術を開発することが本研究の目的である。以下に本論文の構成を示す。



図 1 Photograph of PaDY P1

第1章では、本論文の社会的背景と自動車の製造ラインの現状について述べ、本研究の目的について説明を行った。

世界の産業用ロボットの適用範囲は拡大を続けており、その稼働台数は増加を続けているが、未だ自動化が進んでいない工程が数多く残っている。本論文では、自動化が遅れている工程として自動車の生産ラインにおける組立工程を例に挙げ、その現状について自動化が困難である理由と共に説明した。これを解決するためには、作業者が得意な作業は作業者が行い、ロボットは作業者が行う必要がない作業を分担して請け負うことで、作業者を支援する共存・協調型のロボットシステムが有効であることを述べた。例にあげたような組立工程における作業支援システムを実現するために作業者を支援する上での課題について議論し、それを解決する組立作業支援ロボット PaDY を提案した。最後に関連する研究について紹介し、本論文の構成をまとめた。

第2章では、第1章で提案した組立作業支援ロボット PaDY のコンセプトを説明し、対象とするモデル工程と試作機のシステム構成について述べた。

提案するシステムで対象とするモデル工程は、自動車生産ラインの小物部品の組立工程である。この工程では、作業者は頭上を流れる車体に対して部品の組み付け作業を行う。提案するロボットは、このような組立工程において「作業者が必要な時に必要なものを作業者の手元へ配送する」システムである。ロボットアームで部品・工具を配送することにより、作業者は本来の作業にのみ集中することができるため、作業効率の向上や作業負荷の軽減が期待される。

提案するシステムは部品・工具の供給を行うロボットアームと作業者の運動を計測する位置計測システム、ロボットアームへの部品の補充を行うパーツフィーダ、ロボットアームに搭載する工具の交換を行うツールチェンジャ、およびコントロールシステムで構成される。特に本章では、作業者に部品と工具を搬送するロボットアーム

ムに要求される機能をまとめ、アーム構造の検討を行った。また、実際の作業員による作業の計測結果からロボットアームに必要な可動範囲を求めた。軽量広可動域でありながら部品と工具を作業員へ配送するに足る性能を有するようにアームの強度計算とアクチュエータの選定を行った。さらに、作業員と共存することを考慮した上での安全設計について述べた。また、ロボットが作業員の動作を認識するための作業員の運動計測システムについて述べた。

第3章では、まず、従来の作業員の位置計測手法について説明し、本研究における作業員の位置計測手法を提案し、レーザー式測距センサから得られたデータに対してクラスタリング手法を適用することで作業員の位置を計測する手順について詳細に述べた。また、作業員の位置計測システムから得られる作業員の運動情報から作業員の作業の特徴を表す「作業モデル」を生成する手法を提案した。

提案する作業員の位置計測では、計測データにクラスタリング手法を適用することでクラスタを生成し、生成されたクラスタの中から作業員の腰と脚を表すクラスタの探索を行い、その結果から作業員クラスタの特定を行うことで作業員を表す計測点を求める。この計測点から作業員の位置を計算し、作業員の運動計測に用いた。

一般に生産ラインで稼働する産業用ロボットはティーチングプレイバック方式で動作している。しかしながら、本研究で提案する組立作業支援ロボットのように、ロボットが作業員と協調して作業を行う場合はこの方法を用いることはできない。なぜならば、ロボットが作業員との協調動作を実現するためには、ロボットは作業員の動作に適応して動作する必要があるためである。また、提案するシステムは作業支援により生産的でない作業を低減するものであるため、作業員からの力を受けてその力を補助する「パワーアシスト」のような方法は適用できない。そこで、本研究では作業員の運動データから作業員の作業モデルを生成し、これを用いることで作業員の支援を行うロボットの運動生成を行うことを考えた。本手法では、作業員の運動データを統計的に扱うことで作業員の作業モデルの生成を行う。本研究では特に、作業員が作業している可能性の高い場所を示す“位置に対する作業員の存在率”，作業時間に対して作業員が各作業をしている可能性を示す“時間に対する作業の実行率”，位置に対して各作業を作業員が行っている可能性を示す“位置に対する作業の実行率”を定義し、その詳細について述べた。最後に、実際の作業員の動作を計測し、作業モデルを生成する実験を行い、その結果を示した。

第4章では、前章で求めた作業員の作業モデルから作業員を支援するためのロボットの運動計画を行う手法について述べた。ロボットは作業員毎に作業モデルを生成し、各作業員に適応した運動を行うことで作業員に対して部品と工具の配送を行う。

本章では、まず、提案する運動計画手法の概要について説明し、部品と工具を作業員に対して供給する場所の決定手法・供給時刻の決定手法について述べた。次に、ロボットの部品補給・工具交換タイミングについて説明し、軌道生成の指針について述べた。また、システムのコントロールアーキテクチャについて説明し、提案手法

によりロボットが作業者と協調作業を行えることを実験により確認した。

また、作業者の作業モデルを用いることでロボットが作業者と衝突するリスクを低減する軌道を生成する手法について述べた。第3章で示されたように作業者の作業位置は一点に集中するため、作業者が作業を行う可能性の高い座標について考慮することで衝突のリスクの少ない軌道計画を行うことができる。

軌道計画手法の提案に当たって、まず、マニピュレータにおける障害物回避手法について例を挙げて紹介し、本システムにおける障害物回避の着想について述べた。次に、“位置に対する作業者の存在率”を C-Space 上で考慮することで衝突回避軌道を生成する手順を詳細に説明した。最後に、実験により提案手法が有効であることを確認した。

第5章では、作業者への部品と工具の供給時刻を作業者の動作に合わせて適応的に修正する手法を提案した。

作業者の動作は試行毎に異なるため、前章にて述べた運動生成手法によって作業者に合わせたロボットの運動を生成した際にも作業者はロボットによる部品・工具の配送を待つことがある。必要な部品・工具の配送をロボットが行うことにより、作業者が行うべき作業は低減するものの、作業者がロボットを待つ時間が発生してしまった場合、この待ち時間が作業効率を低下される要因になりかねない。この時間的ロスをなくすため、作業者の進度に合わせて部品・工具の供給時刻の修正を行う手法を提案した。供給時刻の修正手法を提案するに当たって、まず、計測された作業者の位置と作業モデルから作業進度を推定する手法について述べた。次に、推定された作業進度から供給時刻の修正を行う手法について説明した。最後に、この手法を導入した時のシステムのコントロールアーキテクチャについて説明し、提案手法によりロボットが作業者の作業進度に合わせて協調作業を行えることを実験により確認した。

第6章では、本研究で提案する組立作業支援システム PaDY の導入による作業効率改善の効果について実験により評価を行った。

評価に当たって、パーツフィーダによる効果と提案するシステムによる部品・工具の配送による効果、作業者の動作に合わせた支援による効果の3つの効果の検証を行った。作業者の作業時間と移動距離の観点から評価を行った結果、提案する組立作業支援システム PaDY が実際の組立作業現場において有効であることが示された。

最後に第7章では、本論文についてまとめ、今後の展望について述べた。

論文審査結果の要旨

世界初の産業用ロボットが米国で誕生してから約 50 年が経過し、工場内の様々な工程で利用されるようになった。しかし、ロボットによる自動化が可能な作業は未だ限られており、自動車の最終組み立て工程のように、ロボットによっては、自動化することができない多くの工程が残されている。このような自動化が難しい作業は、多くの熟練作業員によって行われており、作業負荷の低減と作業効率の向上が、大きな問題となっている。そこで本論文は、自動車の最終組み立て工程を対象とし、作業員の手元へ部品・工具を供給することによって、作業負荷の低減と作業効率の向上を図る組立作業パートナロボット PaDY (in-time-Parts/tools-Delivery-to-You robot) を提案するもので、全編 7 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章は、新しい組立作業パートナロボット PaDY の概念、対象とする組立作業工程、PaDY のシステム構成について述べている。提案する PaDY は、実作業を対象とした、人と共存する世界初の組立作業支援ロボットで、極めて重要な成果である。

第 3 章は、作業員の運動計測手法とその統計的解析結果について述べている。対象とする作業工程において、作業員の運動を計測し、作業員の作業位置、作業時間、作業内容とそれらの関係について統計的に解析を行っている。これは、PaDY の制御システムの設計のための重要な知見である。

第 4 章は、前章で得られた統計的解析結果に基づき、ロボットによる作業員への部品・工具の供給位置、供給タイミングの決定手法と、ロボットと作業員との衝突リスクを低減するための部品・工具供給経路生成法について提案し、実験によりその有効性を示している。これは、提案するロボットの実用化に向けた有益な成果である。

第 5 章は、作業員の作業進度に応じて、供給タイミングを修正する手法を提案し、実際の自動車最終組立工程ラインで実験を行い、供給タイミングの修正によって、作業時間の更なる短縮が可能なことを示している。これは、組立作業支援ロボットの有効性を示す重要な成果である。

第 6 章は、提案するシステムの有効性を示すため、実際の自動車組立最終工程ラインにおいて、人手のみによる作業、部品供給装置を利用して作業を行った場合、PaDY を用いて部品・工具を作業員の手元に届け作業を行った場合、さらに、PaDY による部品・工具供給タイミングを作業員の作業進度に合わせて修正し作業を行った場合についての比較実験を行い、PaDY の有効性を検証している。これは提案するシステムの実用化に向けた重要な成果である。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、自動車の最終組立作業工程を対象とした組立作業支援ロボット PaDY を提案し、実験を行い、その有効性を示したもので、バイオロボティクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。